



·高功率微波技术·

无人机定位系统辐照干扰失效全过程与机理分析

余道杰¹, 贺 凯¹, 郭柏森^{1,2}, 雷顺天¹, 柴梦娟¹, 王 东¹, 田周泰¹

(1. 战略支援部队信息工程大学 信息系统工程学院, 郑州 450000; 2. 郑州大学 网络空间安全学院, 郑州 450000)

摘 要: 定位系统是无人机核心单元中的电磁敏感环节, 是无人机电磁防护的重点部位。为了分析电磁干扰效应机理与失效过程, 以典型自组装无人机定位系统为目标, 通过电磁拓扑模型分析干扰耦合方式, 分析不同耦合路径下辐照干扰耦合机理和作用机制。采用 GPS 增强转发系统在电波暗室内为无人机系统提供正常动态工作环境, 并依据标准开展微波辐照干扰效应试验, 通过无人机系统固件中的日志记录功能, 结合地面站监测实时状态, 实现无人机定位系统电磁干扰效应全过程动态特征数据记录与故障机理分析。试验结果表明: 无人机接收天线耦合干扰主要发生在定位系统最大接收带宽(200 MHz)之内; 线缆耦合干扰主要在 1 GHz 以下的频段内且在 171 MHz 和 511 MHz 附近达到最大值; PCB 电路耦合干扰主要在 1.24 GHz 以上频段, 耦合电压波动性随着干扰信号频率增加而变强。

关键词: 无人机; 定位系统; 辐照干扰; 失效机理; 等效试验

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220196

Failure process and mechanism of irradiation interference in unmanned aerial vehicle positioning system

Yu Daojie¹, He Kai¹, Guo Baisen^{1,2}, Lei Shuntian¹, Chai Mengjuan¹, Wang Dong¹, Tian Zhoutai¹

(1. School of Information System Engineering, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Cyberspace Security, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Positioning system is the electromagnetic sensitive part in the core unit of unmanned aerial vehicle (UAV) and the key part of UAV electromagnetic protection. To analyze the failure process and mechanism of electromagnetic interference, aiming at the positioning system of typical self-assembled UAV, the radiation coupling path is analyzed by constructing the electromagnetic topology and the radiation interference effects of different coupling paths of UAV positioning system are simulated and analyzed. The GPS enhanced forwarding system is used to provide a normal working environment for the UAV system in the anechoic chamber and the microwave irradiation interference effect experiment is carried out. Through the logging function in the UAV's firmware, combined with the real-time monitoring data in ground station, the whole process data recording and fault mechanism analysis of the electromagnetic interference of the UAV positioning system are realized. The experimental results show that the coupling interference of the receiving antenna mainly occurs within the maximum receiving bandwidth (200 MHz) of the positioning system; Cable coupling interference mainly occurs in the frequency band below 1 GHz and reaches the maximum near 171 MHz and 511 MHz; The coupling interference of PCB circuit mainly occurs in the frequency band above 1.24 GHz and the fluctuation of coupling voltage becomes stronger with the increase of interference signal frequency.

Key words: unmanned aerial vehicle, positioning system, irradiation interference, failure mechanism, equivalent experiment

无人机由于其高机动性和隐蔽性, 在侦察、遥感测绘和植保等领域都得到了广泛应用^[1-2]。随着无人机系统模块化程度的提高, 其技术门槛也越来越低, 大量自组装无人机的出现给监管带来了巨大的挑战。现阶段辐照干扰

* 收稿日期: 2022-06-13; 修订日期: 2022-09-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(61871405)
联系方式: 余道杰, yudj2003@163.com。
通信作者: 贺 凯, 1400062702@pku.edu.cn。

是无人机监管防控的主要手段,为了提升防控效率,国内外针对包括定位系统在内的无人机系统的辐照干扰机理进行了多方面的研究。文献[3]和文献[4]分别从前门耦合和不同类型线缆耦合的角度对航空飞机瞬态强电磁脉冲辐射故障的机理进行分析。文献[5]开展了无人机系统中的各类传感器在0.1~3.4 GHz频率范围的有意电磁干扰条件下的效应试验,但文中特别指出由于在测试期间无法在屏蔽暗室内提供GPS信号,因此无法对无人机定位系统进行干扰评估。军械工程学院研究团队^[6-8]在2015年到2020年间持续通过设计无人机系统辐照电磁效应测试平台,以“失锁”效应为判据,分别针对无人机副遥控系统和动态数据链路,开展了连续波辐照效应和核电磁脉冲效应测试分析,得到了无人机系统的辐照干扰效应现象和故障阈值,但以“失锁”为判据是从系统整机层面对工作状态进行分析,无法分析各部件的干扰机理和故障原因。信息工程大学团队^[9-10]通过外场试验验证了无人机定位系统超宽谱电磁脉冲干扰效应,并采用BCI注入的方法测试评估了线缆耦合路径对无人机定位系统的干扰效应,但辐照干扰在无人机定位系统中的耦合路径更为复杂,需要进一步深入分析。

综上所述,针对无人机定位系统的辐照干扰研究大多在系统整机层面,且由于无人机系统高度集成的特点,目前难以针对无人机定位系统进行部件级效应测试;如果拆分系统,单部件效应测试难以符合实际工作状态,同时难以分析系统拓扑对辐照干扰效应的影响。另一方面,在传统辐照干扰试验方法中,难以实时获取定位系统状态数据,大多基于观测到的试验现象仅得到初始状态、最终状态两种结果。因此如何在无人机动态工作条件下对定位系统辐照干扰全过程动态效应数据进行实时监测与记录,并基于数据对定位系统故障进行识别与分类值得进一步研究。本文从理论仿真分析和等效试验验证两方面,对定位系统强电磁脉冲作用下的动态效应机理与故障过程特征进行综合分析和研究,为无人机反制技术的发展提供了理论支撑和技术基础。

1 无人机定位系统辐照干扰机理分析

1.1 定位系统辐照干扰耦合路径分析

在无人机正常工作状态下,定位系统接收GPS信号后,通过信号线缆传递给飞控系统,以此确定无人机的位置并调整无人机飞行姿态。无人机定位系统主要由以下四部分构成:接收天线、射频增强子模块、信号通道(包括射频前端、数字信号处理模块和传输接口)和电源分配网络,如图1所示。基于实际物理结构并结合定位系统的电气功能结构,建立如图2所示的无人机定位系统电磁拓扑图^[11]。将无人机定位系统划分为符合GSA原则的三个区域Vol 1, Vol 2和Vol 3。其中实线表示射频信号增强模块1、信号通道2和电源管理模块3之间的电气连接关系,各个模块之间通过微带线相互连接,电源管理模块通过双绞线缆与飞行控制模块相连接。以虚线表示电磁干扰的传播路径与能量流向, PoE(Point of Entry)为电磁干扰耦合节点: PoE 1表示定位系统接收天线产生的前门耦合节点, PoE 2表示定位系统外壳干扰耦合节点, PoE 3表示定位系统与飞行控制系统之间的连接线缆干扰耦合节点, PoE 4和 PoE 5表示定位系统PCB电路微带线干扰耦合节点。

从无人机定位系统电磁拓扑图可知,辐照干扰对无人机定位系统的耦合路径主要分为三种:在前门耦合路径中辐照干扰通过定位系统接收天线进入无人机系统;在后门耦合路径中,一方面辐照干扰通过连接定位系统与飞行控制系统的线缆耦合进入无人机系统,另一方面印制电路板(PCB)的电源接地层在微波辐照环境中充当辐射微带贴片天线,因此辐照干扰信号会通过PCB板耦合进入无人机定位系统从而影响系统的正常工作^[12-13]。

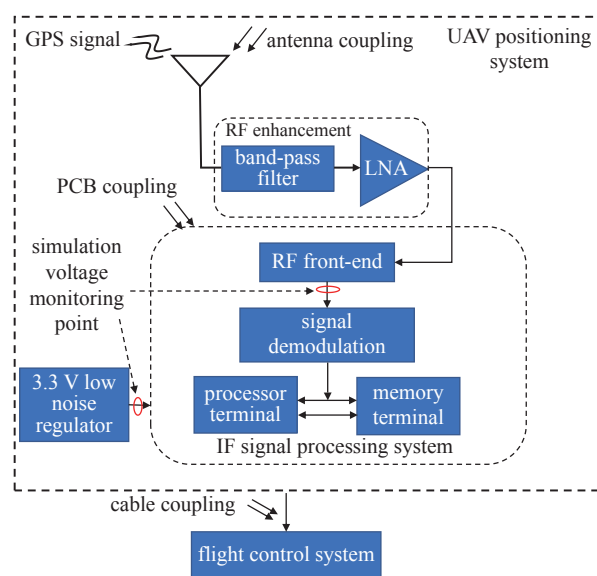


Fig. 1 Electrical function structure diagram of UAV positioning system

图1 无人机定位系统电气功能结构示意图

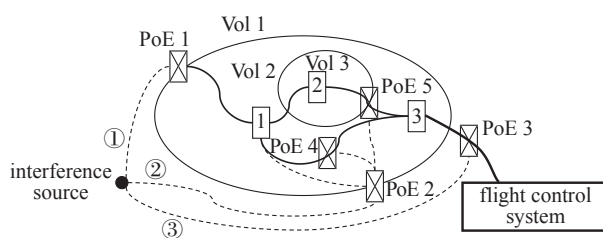


Fig. 2 Electromagnetic topology model of UAV positioning system

图2 无人机定位系统电磁拓扑模型

根据上述分析设计仿真模型,重点对不同耦合路径的干扰强度与敏感频率范围进行分析。针对无人机定位系统前门接收带宽进行仿真分析,判断前门耦合故障的敏感频率;针对无人机定位系统 PCB 选取如图 1 中所示的两个点位进行电压波动仿真分析,分别观察在无人机定位系统受到不同频率辐照干扰时由 PCB 耦合路径进入电源分配网络和信号输入管脚的电磁干扰电压幅值;针对无人机定位系统的连接线缆进行建模,并仿真分析在辐照情况下线缆传导耦合电压变化的情况。

1.2 无人机定位系统前门耦合特征分析

定位系统采用 25 mm×25 mm 尺寸的陶瓷贴片作为基底,接收定位信号的金属辐照面为 19 mm×19 mm 的正方形,其在 XY 方向上对称以保证其共振基本一致从而达到均匀的方向性。由于 GPS 信号有触地反射的特性,因此承载 GPS 陶瓷天线的 PCB 电路略大于 GPS 陶瓷天线的尺寸,采用 31.8 mm×31.8 mm 的正方形;为了匹配天线阻抗,馈电点向 Y 的负方向上移动 2.5 mm 的距离,建立其 CST 仿真模型如图 3 所示。根据图 4 所示的天线 S_{11} 参数判断天线的辐照特性,该型号 GPS 天线的中心频率约为 1.572 GHz,天线带宽约为 12 MHz。

设 GPS 信号为 $X_s(t)$ 且与干扰信号 $A \cos(2\pi ft)$ 相比较小,则干扰信号将使放大电路处于正负峰值限幅状态,此时无人机定位系统射频前端的输出电流为

$$i(t) = \begin{cases} \left(\frac{b}{a}\right)[X_s(t) + A \cos 2\pi ft], & |A \cos 2\pi ft| < a \\ \pm b, & |A \cos 2\pi ft| \geq a \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为输出电流饱和时的输入电压值, b 为输出电流饱和时的输出电流值。上式可以进一步改写为

$$i(t) = \left(\frac{b}{a}\right)[X_s(t) + A \cos 2\pi ft]S(t) + R(t) = \left(\frac{b}{a}\right)[X_s(t) + A \cos 2\pi ft] \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2\pi n ft \right] + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos 2\pi n ft \quad (2)$$

式中: $S(t)$ 为单位幅度取样波形, $R(t)$ 为幅度为 b 的双极性波形,其波形的周期由于干扰信号的周期决定。将上式展开为傅里叶级数表达式,由于距离 GPS 信号中心频率较远的频率分量将被滤除,因此在 GPS 信号中心频率处的输出电流分量的表达式为

$$i_d(t) = \left(\frac{b}{a}\right)a_0 X_s(t) \quad (3)$$

在强电磁脉冲辐照干扰的情况下,在定位系统中接收信号取样波形的直流分量可直接影响 GPS 模块射频前端输出电流的大小,当辐照场强较低时降低定位系统灵敏度,导致工作状态异常,但电路尚未损坏;当辐照场强过大时,会造成电路损坏并导致定位系统完全损毁。当辐照干扰频率远离定位系统最大接收频带时,辐照干扰一般不能通过前门耦合的方式进入定位系统^[4]。因此前门耦合干扰范围仅存在于定位系统接收天线的工作带宽之内。

1.3 定位系统 PCB 耦合特性仿真

针对前述无人机 GPS 系统,利用 Candence 软件绘制定位系统电路结构,然后导入 CST EMI 电路辐射抗扰度仿真工作室,建立如图 5 所示的定位系统 CST 电路仿真模型,在定位系统的 Y 方向上添加平面波辐照干扰,以模拟辐照干扰来自正前方的情况。在定位系统 PCB 上添加两处电压监测器:一处为电源网络电压监测器显示由于辐照干扰引起的电源分配网络的电压波动情况;另一处为射频输入电压监测器,用于显示辐照干扰引起的 GPS 信号处理芯片射频信号输入端的耦合电压变化情况。

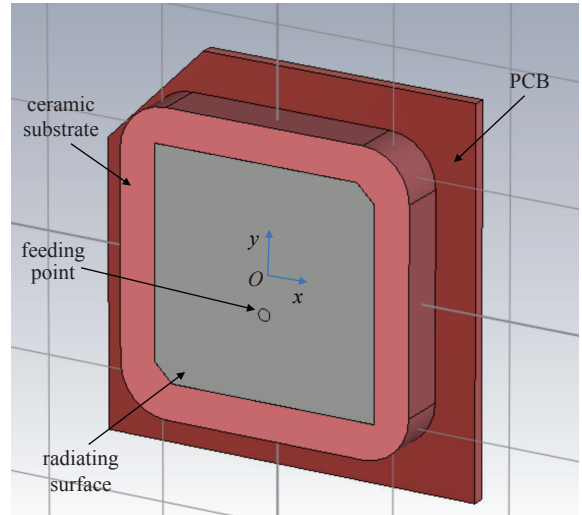


Fig. 3 CST simulation model of receiving antenna in positioning system

图 3 定位系统接收天线 CST 仿真模型

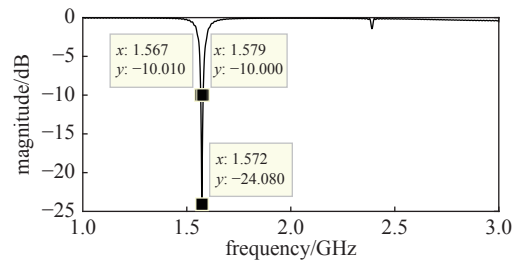


Fig. 4 S_{11} parameter of receiving antenna of positioning system

图 4 定位系统接收天线 S_{11} 参数

当辐照干扰平面波电场强度设置为 50 V/m 时, 两处电压监测器的电压随频率的变化如图 6 所示。当干扰频率较低时(1 GHz 以下), 耦合干扰电压不明显; 当辐照干扰频率达到 1.24 GHz 时, 进入无人机定位系统电源网络的耦合干扰电压开始增加, 且在 2.22 GHz 处达到峰值, 约为 0.27 V, 无人机定位系统的供电电压是 3.3 V, 峰值超出供电电压的 8.2%, 超出电源电压波动允许范围, 导致电源网络稳定性下降; 同时观测耦合至 GPS 信号处理芯片射频输入端的辐照干扰电压变化情况, 在 2 MHz~3 GHz 内随着干扰频率的增加耦合干扰电压强度逐渐增大, 当干扰频率达到 1.3 GHz 以上时, 干扰电平超过 0.003 2 V(约为 10 dBmV)。在工作频段范围内, 信号传输网络的耦合干扰电压超过 10 dBmV, 可能导致信号信噪比低于跟踪与导航门限值^[15]。

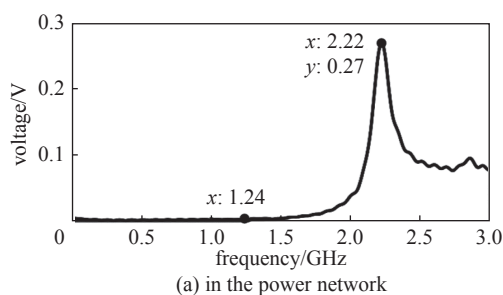


Fig. 6 PCB coupled voltage variation of key points in the PCB circuit

图 6 定位系统 PCB 耦合干扰电压波动情况

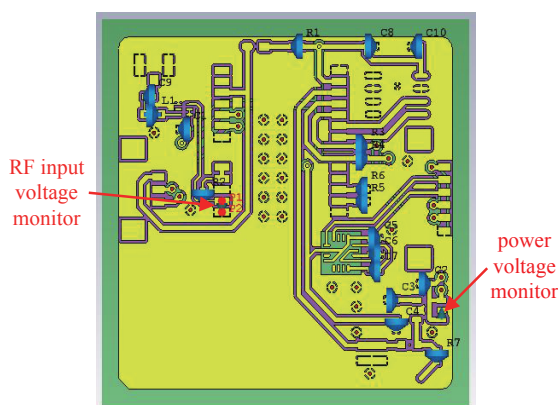
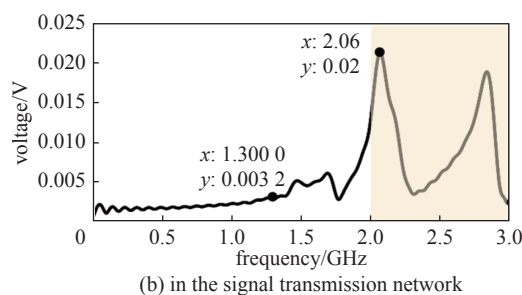


Fig. 5 Simulation model of the EMI effect of PCB coupling path

图 5 定位系统 PCB 耦合电磁干扰效应 CST 仿真模型



1.4 定位系统线缆耦合特征仿真

无人机定位系统通过双绞线与无人机飞控系统相连接, 进行供电与位置信息的交互, 双绞线长度约 0.3 m。在 CST EMI 工作室传导耦合仿真工作室中, 建立如图 7 所示的无人机定位系统线缆模型并设置平面波辐照源, 判断不同干扰条件下线缆耦合路径对定位系统工作电压的影响情况。

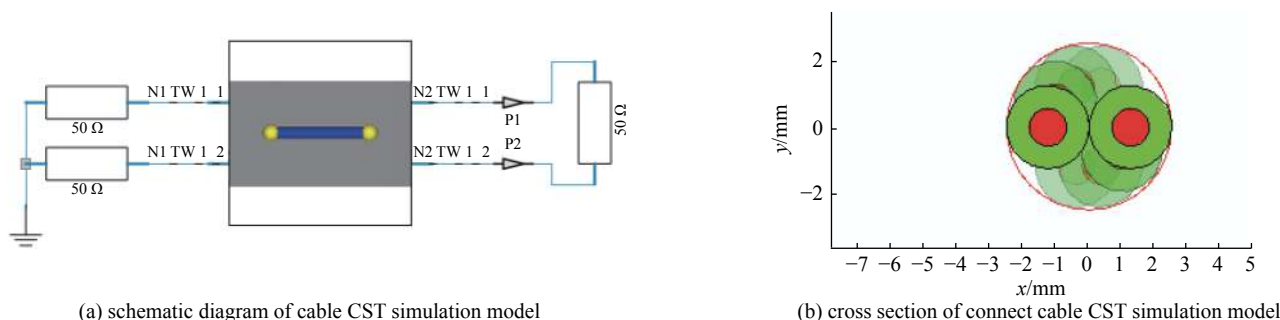


Fig. 7 Positioning system cable CST simulation model

图 7 定位系统连接线缆 CST 仿真模型

在 50 V/m 的辐照干扰场强下, 定位系统线缆耦合干扰电压波动情况如图 8 所示, 结果表明: 线缆耦合电压与辐照干扰频率相关, 低频段干扰波动较为明显, 且在 171 MHz 附近达到最大值, 同时在 511 MHz 处有一个极值; 无人机定位系统额定工作电压为 3.3 V, 干扰电压波动范围为 -3.8~4.699 V。干扰电压超过定位系统额定工作电压约 112%。由于连接线缆中包括电源线与数据传输线, 因此线缆耦合电压过大将导致定位系统无法正常工作甚至烧毁, 同时可能导致定位系统与飞控系统之间通信中断的问题。根据传输线理论与天线理论, 80~400 MHz 的干扰信号对应的波长为 3.75~0.75 m, 此频段内干扰信号的四分之一波长与连接定位系统和飞控系统之间的线缆长度比较接近, 此时线缆相当于接收天线的振子单元^[16], 通过线缆耦合至定位系统的辐射干扰达到最大。由于该类型故障与线缆长度密切相关, 因此当辐照干扰频率发生变化后, 该类型的故障在不导致物理损伤的情况下可恢复

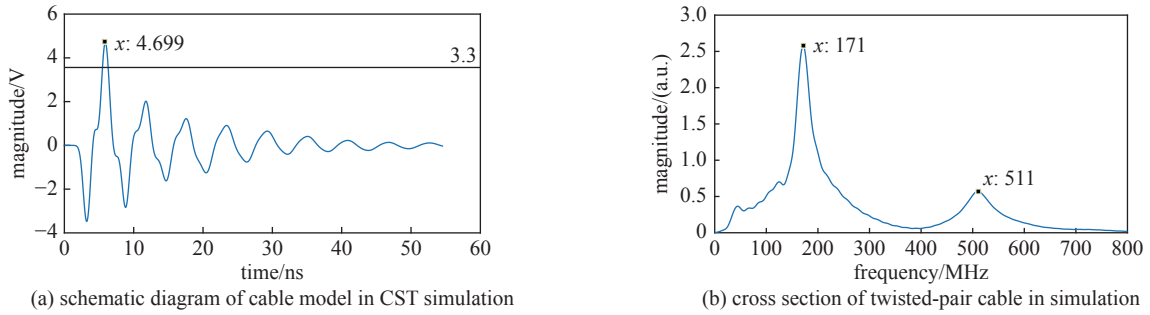


Fig. 8 Cable model of positioning system in CST simulation

图 8 定位系统线缆耦合干扰电压波动情况

正常。

2 无人机定位系统辐照干扰试验方案

2.1 辐照干扰试验方案设计

针对试验场景的不同,无人机辐照电磁效应试验可以分为外场试验和室内试验。在外场试验过程中,一般在无障碍物的开阔地直接对无人机系统进行辐照测试,空间中的射频干扰信号难以控制,无法准确评估无人机系统的电磁辐照干扰效应;但室内试验需要解决如何使无人机系统进入正常动态工作状态的难题。本文通过 GPS 增强转发装置将室外 GPS 信号转发至室内,在电波暗室内提供测试环境,以高逼真度模拟干扰实际场景,同时满足 GJB 151B-2013: RS103 标准室内测试要求。

定位系统辐照干扰等效试验系统原理图如图 9 所示,系统分为三个部分:GPS 信号增强转发子系统、辐照干扰产生子系统和无人机状态监测与数据记录子系统。在 GPS 信号增强转发子系统中,由位于室外开阔无障碍物位置的 GPS 信号接收天线接收卫星信号,然后通过 GPS 信号增强转发器将定位信号传输至位于电波暗室内的 GPS 信号发射天线,通过调整控制室外 GPS 的运动状态,达到模拟无人机动态飞行的效果。在辐照干扰产生子系统中,信号源产生的干扰信号覆盖 2 MHz~3 GHz,并通过功率放大器和定向耦合器从辐照天线向待测区域辐照,同时使用功率计监测功率放大器和定向耦合器的输出功率。在无人机状态监测与数据记录子系统中,将无人机系统按照实际的工作方式设置于测试区域后,连接飞控模块与地面站的电脑监测端,通过监测软件 Mission Planner 对无人机系统进行实时监测及数据采集。飞控模块和地面站之间的连接线利用铜箔进行屏蔽处理,并通过一个共模信号吸收设备消除辐照干扰信号对监测系统的影响,确保数据可靠有效的传输。定位系统辐照干扰等效试验系统实物如图 10 所示。

2.2 辐照干扰试验流程

测试过程中,采用扫频的方式对无人机定位系统进行辐照干扰^[17]。为了降低对设备性能的需求,同时保证每个辐照干扰频段内测试的有效性,将 2 MHz~3 GHz 试验范围划分为如图 1 所示的 4 个测试频段,扫描步长和最大扫描速率满足表 1 所示的条件,其中 f_0 为信号发生器调谐频率。为了便于对定位系统状态数据进行提取和分析,同时保证系统安全,所选取的测试场强不能过大以至于对定位系统造成硬损伤。基于测试标准和定位系统工作状态,试验流程如下:

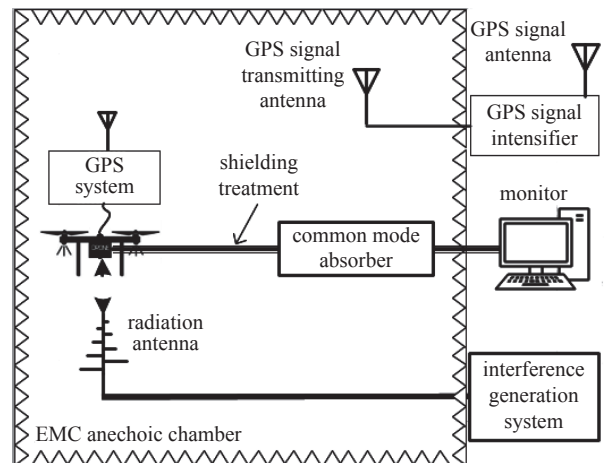


Fig. 9 Equivalent test system of RFI for UAV positioning system

图 9 无人机定位系统辐照干扰等效试验系统原理图

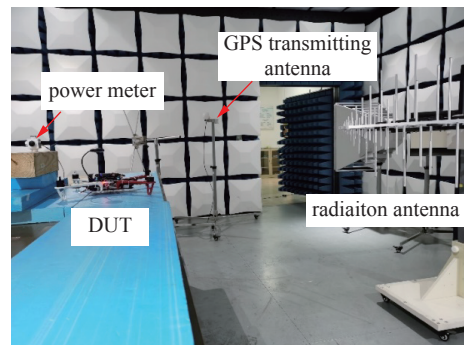


Fig. 10 RFI experimental equipment for UAV positioning system

图 10 辐照干扰等效试验系统图

表 1 敏感度扫描参数表
Table 1 Sensitivity scan parameters

frequency range/MHz	maximum step size of frequency scan	maximum frequency scan rate/s
2~30	$0.01f_0$	$0.00667/f_0$
30~200	$0.005f_0$	$0.00333/f_0$
200~1000	$0.005f_0$	$0.00333/f_0$
1000~3000	$0.0025f_0$	$0.00167/f_0$

- ①按照无人机定位系统辐照干扰等效试验方案搭建系统,在试验区域设置并校准待测无人机定位系统;
- ②将无人机系统连接至地面站,并进行屏蔽处理;
- ③设置并校准 GPS 信号增强转发系统;
- ④校准信号源,设置辐照敏感度扫描参数;
- ⑤待无人机系统进入正常工作状态后,向试验区域辐射干扰信号并步进干扰频率,记录效应现象;
- ⑥通过地面站监测并记录定位系统状态数据及现象,基于状态数据对定位系统故障进行识别和分类;
- ⑦初始化无人机系统和干扰设备,调整辐照场强和测试频段,重复进行步骤④~⑥。

3 定位系统辐照干扰试验结果分析

3.1 定位系统故障频率分布特征分析

利用内置于飞控系统内的监测软件,记录无人机定位系统试验过程中的各项参数并在测试结束后下载。为了分析无人机定位系统故障与干扰信号频率之间的关系,判断定位系统的敏感频段,根据频率与幅值之间的关系建立坐标系,为了降低在长时间的试验过程中偶然因素的影响,采用多次重复试验的方法并将试验中记录的定位系统的状态按照频率和幅值的关系分块显示在坐标系中,形成定位系统故障—频率分布特征图。横轴表示离散的辐照干扰频率,纵轴表示离散的辐照干扰场强,蓝色区域表示在该测试频率与测试等级下无人机定位系统无故障,黄色区域表示系统发生故障。测试频段内的无人机定位系统故障频率分布特征如图 11 所示。

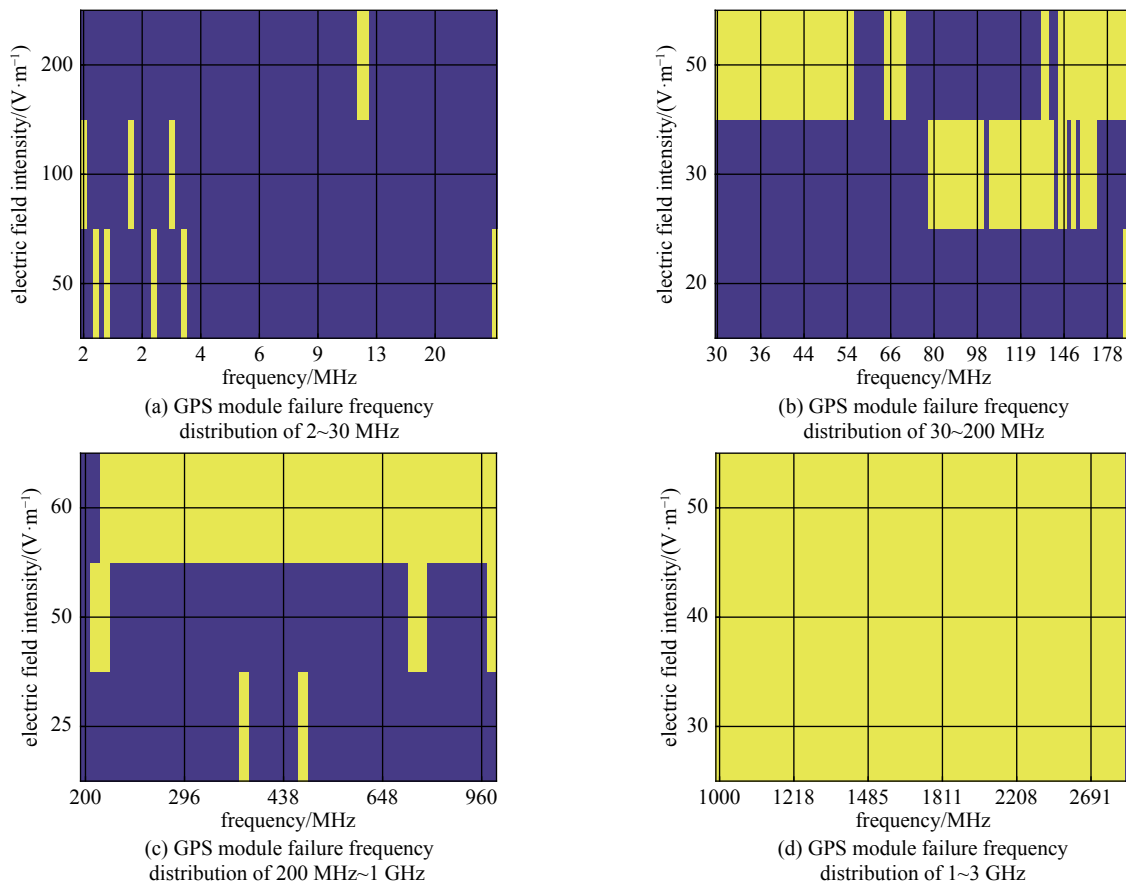


Fig. 11 Failure frequency distribution of UAV positioning system

图 11 无人机定位系统故障频率分布特征图

分析可知,当辐照干扰频率为 $2\sim 30$ MHz时,无人机系统在不同辐照场强下出现的故障频率之间没有明显的关联性,且故障持续的时间较短,在多次试验中只在一个或两个频点发生,可判断为偶然事件。当辐照干扰频率为 30 MHz ~ 1 GHz时,故障分布与辐照频率有较强的相关性。当辐照干扰信号频率改变后,故障在不经过人为干预的条件下可以自行恢复。同时随着辐照干扰场强的增加,定位系统出现故障的频率范围变大。当辐照干扰频率为 $1\sim 3$ GHz时,无人机定位系统在此频段和测试场强条件均无法正常工作,随着辐照频率的变化定位系统未发生损坏但无人机故障并未恢复。

由上述理论分析和仿真结果联合分析可知,在 30 MHz ~ 1 GHz范围内通过PCB耦合路径和接收天线耦合路径产生的干扰较小,线缆耦合路径中产生的干扰电压达到 4 V以上,且线缆耦合干扰电压谱密度量级与辐照干扰频率相关,因此在该频段内辐照干扰主要通过连接线缆进入定位系统造成定位系统故障;当辐照干扰频率为 $1\sim 3$ GHz时,由于前门耦合干扰仅在辐照干扰频率位于最大接收带宽之内时发生,且由仿真结果可知电路板耦合路径干扰在 $1\sim 3$ GHz范围内增大,因此在该频段内辐照干扰同时通过PCB耦合路径和接收天线耦合路径进入定位系统并造成定位系统故障。

3.2 定位系统故障类型特征分析

水平精度因子(Horizontal Dilution of Precision, HDOP)可以衡量已经被识别的卫星组成的星座对定位精度影响的程度^[18-19],对定位的误差有放大作用,因此本文选取被识别的卫星数量和水平精度因子作为衡量定位系统工作性能的指标,判断定位系统在不同频率辐照干扰下的故障类型。提取定位系统发生故障频点处的相关数据如图12和图13所示。

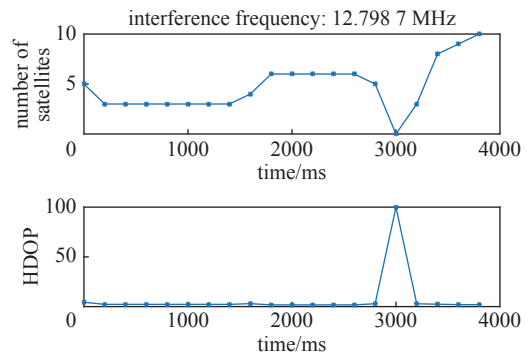


Fig. 12 Random failure caused by accidental events

图12 偶然事件的随机故障

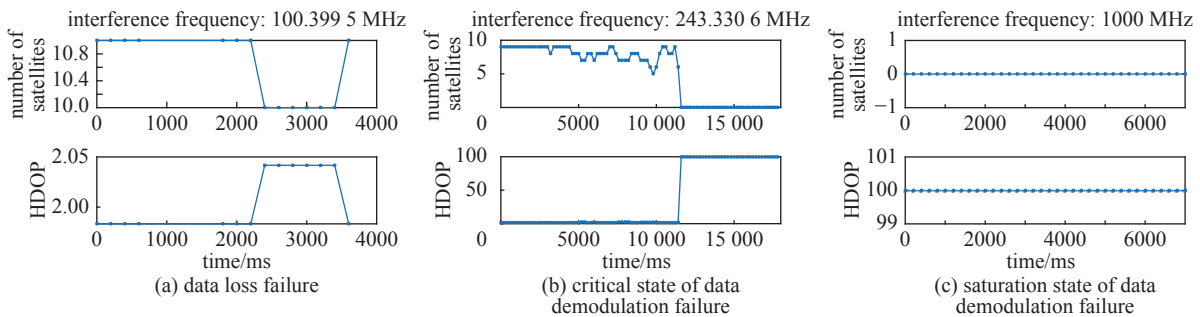


Fig. 13 Schematic diagram of three typical failures for UAV positioning system

图13 无人机定位系统三种典型故障局部频点状态图

当辐照干扰频率为 $2\sim 30$ MHz时,定位系统仅出现持续 0.2 s的随机故障如图12所示,仍在无人机系统工作允许范围内,且故障与辐照干扰的场强和频率无关,因此无法对无人机定位系统造成有效干扰,仿真结果同样显示在较低频段内,各耦合路径的干扰耦合量都较低,属于偶然事件。

当辐照干扰频率在 $30\sim 200$ MHz时,无人机定位系统出现如图13(a)所示的故障,定位系统出现数据丢失停止工作的现象,故障持续时间约为 1.4 s。该类型的故障与线缆耦合仿真中的敏感频段重合,且当辐照频率变化后定位系统恢复正常工作,判定为数据丢失故障;当辐照干扰信号频率在 200 MHz ~ 1 GHz范围时,定位系统输出数据示例如图13(b)所示。此时定位系统的数据更新频率和数量未出现丢失,在同一干扰频率下定位系统处于临界工作状态,判定为信号解调故障临界状态;当辐照干扰频率在 $1\sim 3$ GHz之间时,定位系统的采样频率正常,未出现数据丢失的现象,但GPS信号解调失败,导致连接卫星数量为零且水平精度因子达到最大值,无法对无人机进行定位,判定为信号解调故障饱和状态,如图13(c)所示。

因此以定位数据的采样频率与数据数量进行分类,无人机定位系统电磁干扰故障可以分为数据丢失、信号解调故障临界状态和信号解调故障饱和状态三种:一是由于定位系统暂停工作导致其采样频率发生变化或数据丢失,该类型故障主要分布在 $30\sim 200$ MHz的较低的干扰频段内,辐照干扰耦合路径主要为定位系统连接线缆;二是

当辐照干扰信号频率在 200 MHz~1 GHz 范围时,定位系统的数据更新频率和数量未出现丢失,但 GPS 解调信号时有时无,在同一干扰频率下定位系统处于临界工作状态;三是由于 GPS 信号信噪比过低或工作状态不稳定导致定位信号解调失败,该类型的故障主要分布在 1~3 GHz 的干扰频段内,辐照干扰耦合路径主要为定位系统接收天线和 PCB。

4 结 论

本文分析了无人机定位系统的辐照干扰耦合路径,仿真分析了每种干扰耦合路径的影响大小与失效频率范围,然后通过 GPS 转发增强系统为电波暗室内无人机定位系统提供正常工作环境,实现无人机受到辐照干扰时的真实场景模拟还原,最后基于 GJB 151B-2013: RS103 标准规定的辐照实验方法开展了无人机定位系统辐照干扰效应试验,通过监测软件记录并分析效应数据,有效验证了仿真分析的准确性,并得到如下结论:

(1) 2~30 MHz 频段内无法对无人机系统造成有效的干扰;在 30 MHz~1 GHz 频段内,故障分布与辐照频率有较强的相关性,当辐照频率改变后定位系统故障可自行恢复;在 1~3 GHz 频段内,无人机定位系统在所有测试频段和测试场强下均无法正常工作。

(2) 无人机定位系统电磁干扰故障分为数据丢失、信号解调故障临界状态和信号解调故障饱和状态三种类型。1GHz 以下频段辐照干扰主要通过线缆耦合路径进入定位系统的电源分配网络造成定位系统工作性能下降或停止工作,由于线缆耦合干扰与辐照干扰频率相关,因此随着频率的改变故障可自动消除;1~3 GHz 频段内,辐照干扰由接收天线耦合路径和 PCB 耦合路径进入定位系统,造成全频段内定位信号解调失败故障。因此,在无人机反制过程中应针对无人机目标的不同特征采用不同的辐照干扰方式,以提升反制效率。

参考文献:

- [1] Greenwood W W, Lynch J P, Zekkos D. Applications of UAVs in civil infrastructure[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2019, 25(2): 1-21.
- [2] Zhan Yilong, Chen Pengchao, Xu Weicheng, et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 216: 32-45.
- [3] Issam S M, Adnane A, Madiabdessalam A. Anti-Jamming techniques for aviation GNSS-based navigation systems: survey[C]//The 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCs). Kenitra: IEEE, 2020: 1-4.
- [4] Chen Chen, Wei Yan, Yang Zhao, et al. Simulation and analysis of EMP transient electromagnetic effect of aircraft[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 2464-2467.
- [5] Lubkowski G, Lanzrath M, Lavau L C, et al. Response of the UAV sensor system to HPEM attacks[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2020: 1-6.
- [6] 张冬晓, 张大铭, 田庆民, 等. 无人机电磁辐照试验评价方法研究[J]. *军械工程学院学报*, 2015, 27(3): 28-32. (Zhang Dongxiao, Zhang Daming, Tian Qingmin, et al. Research on evaluation method of UAV electromagnetic radiation test[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2015, 27(3): 28-32)
- [7] 杜宝舟, 陈亚洲, 程二威, 等. 某型无人机数据链连续波电磁辐照效应试验分析[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 86-91,96. (Du Baozhou, Chen Yazhou, Cheng Erwei, et al. Experiment analysis of continuous wave electromagnetic irradiation effect for a certain type of UAV data link[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(2): 86-91,96)
- [8] 张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 等. 无人机动态数据链路电磁辐射效应试验[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020, 18(4): 643-649. (Zhang Dongxiao, Chen Yazhou, Cheng Erwei, et al. Electromagnetic radiation effects on dynamic datalink of UAV[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(4): 643-649)
- [9] 赵铜城, 余道杰, 周东方, 等. 无人机GPS接收机超宽谱电磁脉冲效应与试验分析[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 023001. (Zhao Tongcheng, Yu Daojie, Zhou Dongfang, et al. Ultra-wide spectrum electromagnetic pulse effect and experimental analysis of UAV GPS receiver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 023001)
- [10] He Kai, Yu Daojie, Guo Baiseng, et al. An equivalent dynamic test system for immunity characterization of the UAV positioning module using bulk current injection method[J]. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, 2(4): 161-164.
- [11] 谢海燕. 瞬态电磁拓扑理论及其在电子系统电磁脉冲效应中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2010: 14-17. (Xie Haiyan. Transient electromagnetic topology theory and its application in electromagnetic pulse effects of electronic systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 14-17)
- [12] Shahparnia S, Ramahi O M. Electromagnetic interference (EMI) reduction from printed circuit boards (PCB) using electromagnetic bandgap structures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(4): 580-587.
- [13] Radu S, Hockanson D. An investigation of PCB radiated emissions from simultaneous switching noise[C]//1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Seattle, WA, USA: IEEE, 1999: 893-898.
- [14] 李新峰, 郝晓军, 韩慧, 等. 基于误码率的通信系统电磁干扰效应研究[J]. *微波学报*, 2017, 33(1): 71-76. (Li Xinfeng, Hao Xiaojun, Han Hui, et al. Electromagnetic interference effect research of communication system based on SER[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(1): 71-76)

- [15] u-blox. NEO-M8: u-blox M8 concurrent GNSS modules[EB/OL]. (2021-10-22).https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf.
- [16] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [17] GJB 151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. (GJB 151B-2013, Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S])
- [18] 张淼艳, 张军, 朱衍波. 卫星导航系统HDOP和VDOP的研究[J]. 遥测遥控, 2009, 30(2): 6-12. (Zhang Miaoyan, Zhang Jun, Zhu Yanbo. Research on the HDOP and VDOP of satellite navigation systems[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2009, 30(2): 6-12)
- [19] 尚俊娜, 刘参. 一种顾及加权水平精度因子的室内宽带定位算法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(6): 792-798. (Shang Junna, Liu Can. Broadband indoor localization algorithm taking into account weighted horizontal dilution of precision[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(6): 792-798)